

DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS EN MATERIALES LAMINARES A PARTIR DE UN ENSAYO VIBROACUSTICO

A. Lima-Rodriguez^{1a}, A. Gonzalez-Herrera^{1b} y J. Garcia-Manrique^{1c}

1. Departamento de Ingeniería Civil, de Materiales y Fabricación
Universidad de Málaga, Málaga, SPAIN
Email: tlima@uma.es^{1a}, agh@uma.es^{1b}, josegmo@uma.es^{1c}

Resumen

Una de las limitaciones que nos encontramos al trabajar con materiales laminares (tipo film) es la correcta determinación de sus propiedades mecánicas. Los ensayos experimentales usuales como el de tracción no son siempre adecuados para evaluarlas, existiendo casos donde el propio procedimiento del ensayo afecta a la validez de los resultados. En este trabajo se propone una metodología no destructiva para caracterizar estos materiales a partir de ensayos vibro-acústicos.

En general una membrana de un material dado responde a una excitación acústica (presión sonora) vibrando en un rango de pequeñas deformaciones. La vibración de la membrana es función de sus características dinámicas, a nivel de frecuencias y de modos de vibración propios. Esta respuesta, controlada la excitación a la que se somete la membrana, es medible, y por tanto puede ayudarnos a inferir sus características mecánicas.

Sin embargo, esto no es inmediato. La interacción entre las ondas sonoras y la respuesta de la membrana (acoplamiento mecánico-acústico) es compleja y requiere un estudio cuidadoso, ya que puede verse afectada por multitud de factores como las fuentes de sonido, los puntos de toma de medida o las magnitudes de las mismas, entre otros.

Palabras claves: material laminar, ensayo vibro acústico, propiedades mecánicas.

1. Introducción

Los materiales laminares requieren de un especial cuidado a la hora de determinar sus características mecánicas, siendo en ocasiones no indicado el uso de ensayos destructivos (ensayo de tracción) donde la propia solución puede verse afectada por el proceso.

Una aproximación al problema es la de recurrir a mediciones indirectas mediante ensayos dinámicos normalizados [1, 2, 3].

En este artículo proponemos el empleo de una metodología alternativa de ensayo no destructivo mediante ensayos vibro-acústicos. En concreto nos centramos en la respuesta dinámica de láminas del material, de configuraciones variadas, caracterizadas por su muy pequeño espesor y su respuesta dinámica lineal ante una excitación sonora.

Estas geometrías simples son modeladas numéricamente mediante programas de elementos finitos. Aunque el acoplamiento mecánico-acústico de una membrana depende de muchos factores (fuentes de sonido, puntos de toma de medida, frecuencias sonoras, etc.), se han desarrollado modelos contrastados que nos ofrecen buenos resultados [4, 5, 6].

La vibración de la membrana, medida en el ensayo experimental, es función de sus características dinámicas, a nivel de frecuencias y de modos de vibración propios. La correlación entre las medidas experimentales y las numéricas nos permiten ajustar estas últimas mediante la variación de alguna de las propiedades mecánicas modeladas y que gobiernan el fenómeno, como por ejemplo el módulo de Young (E) del material.

2. Propiedades mecánicas de la respuesta dinámica.

Como es conocido, existen ensayos como los de la norma ASTM E 756 – 05 [1] que permiten obtener propiedades dinámicas, como las frecuencias propias y el amortiguamiento del material, y que establecen luego relaciones analíticas con propiedades mecánicas, como el módulo de Young (E) o el módulo transversal (G). Los ensayos se basan en el análisis del comportamiento de una ménsula excitada mediante una vibración en un rango de frecuencias de 50-5000 Hz a diferentes temperaturas. Para el caso de materiales no autoportantes, como sería nuestro caso, recurre a

una configuración donde éste queda unido a un material base con suficiente rigidez. En estos casos el ensayo se repite con la pieza compuesta y con el material base, para establecer relaciones entre los amortiguamientos del segundo frente al conjunto.

La necesidad de unir ambos materiales, la inclusión de adhesivos y las simplificaciones asumidas para establecer las relaciones finales entre respuesta y E suponen unos niveles de precisión que la norma establece en el 20%. En la figura 1 se reproducen las configuraciones adoptadas en la norma:

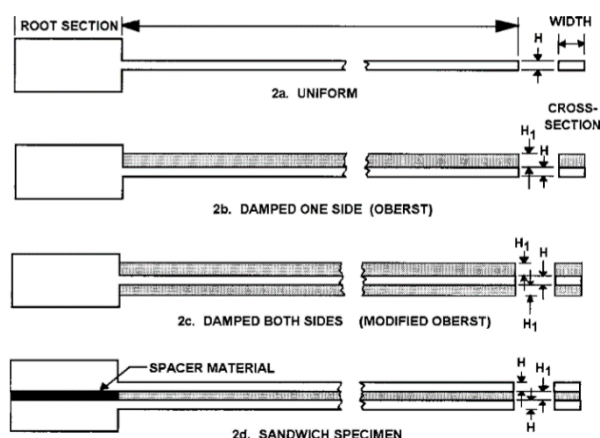


Figura 1: Configuraciones de especímenes de ensayo de la ASTM E 756 – 05

Nuestra propuesta es la de tratar de establecer relaciones dinámico-mecánicas de la muestra sin la adición de material base. Para ellos trabajaremos con una membrana del mismo sometida a una presión sonora.

Hay que destacar varios aspectos de la respuesta dinámica obtenida que nos ofrecen oportunidades a la hora de desarrollar esta metodología. El primero de ellos es que el rango de presiones sonoras a las que son sometidas las muestras del material garantiza que trabajemos dentro de un régimen de pequeñas deformaciones y con una respuesta lineal y elástica del material. De esta manera evitamos muchas fuentes de incertidumbre a la hora de relacionar resultados y propiedades mecánicas, a la vez que reducimos el daño a la muestra y su reutilización en ensayos sucesivos.

El segundo es que, aunque trabajamos con espesores muy pequeños, que mecánicamente se corresponden con un comportamiento propio de una membrana (rigidez despreciable – esfuerzo axial), el fenómeno mecánico que gobierna el problema es la flexión.

Como se esquematiza en la figura 2, la presión sonora es de un valor tal que provoca una ondulación a lo largo de la membrana asimilable a un conjunto de pequeñas flexiones. En este supuesto trabajamos con la inercia de la placa equivalente al espesor de la membrana, pudiendo establecer relaciones conocidas entre inercias, propiedades del material y deformada observada.

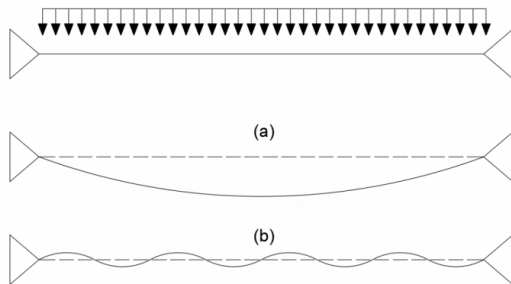


Figura 2: (a) Comportamiento como membrana. (b) Comportamiento a flexión debido a las presiones sonoras recibidas.

3. Caso práctico: simulación numérica y ensayo experimental de un plástico.

3.1. Modelo numérico vibro-acústico.

La simulación numérica de un acoplamiento vibro-acústico es un problema complejo. En general podemos destacar que en todos los modelos aparecen dos volúmenes claramente diferenciados, uno correspondiente a la membrana del material, y otro que engloba al aire que la rodea. Entre ellas hay que establecer una capa de transición que permita el acoplamiento fluido-estructura.

Nuestros modelos han sido programados en rutinas APDL del programa ANSYS, con elementos tipo SOLID185 para los sólidos, FLUID130 para el dominio del aire y FLUID30 para los elementos acústicos. El elemento fluido incorpora respecto al sólido, además de los correspondientes a las traslaciones en X, Y y Z, la presión como grado de libertad. Sin embargo, los grados de libertad de movimiento solo se mantienen activos en las inmediaciones de la membrana para reducir el coste computacional.

Se han simulado diversos materiales, variando la configuración de la posición de la fuente de acuerdo con diversos ensayos experimentales o estudios de carácter numérico [4, 5, 6]

Entre los aspectos críticos del modelo se encuentran las transiciones de los mallados (con

espesores de la membrana de varios órdenes inferiores al tamaño global del modelo completo), el comportamiento a flexión mediante elementos tipo SOLID (fenómeno de “shear-locking”) o el control de la densidad de malla. Para los tamaños y frecuencias de trabajo simuladas se obtuvieron recomendaciones de tamaño mínimo de elemento de 130 μm en la membrana. [5]

En la figura 3 se presentan vistas de uno de los modelos de elementos finitos desarrollados. Se distinguen las particiones del volumen de aire modeladas con grados de libertad restringidos. Se observa también la relación de tamaños de elementos necesaria respecto a la membrana.

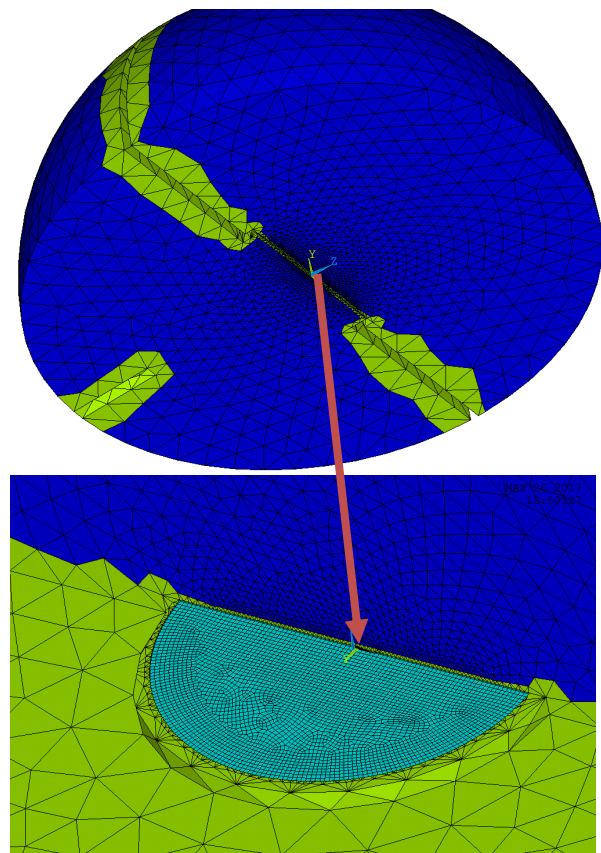


Figura 3: Modelo de malla de la simulación numérica de la respuesta vibro-acústica de una membrana delgada.

Se introducen condiciones de contorno de apoyo en los bordes de la membrana y de volumen infinito en las áreas exteriores de los volúmenes de aire. Debido a la simetría del problema solo es necesario modelar parte incluyendo las correspondientes condiciones de simetría en el programa.

La fuente de sonido se modela como un sólido en la posición e inclinación exacta de acuerdo al experimento. Su posición relativa [3] es otro

aspecto a controlar en el experimento para conseguir respuestas más claras que permitan una mejor correlación de datos.

Un primer análisis modal nos permite determinar las frecuencias naturales del sistema y sus modos de vibración. Los modos de vibración son los esperados para este tipo de geometrías. Sus frecuencias se resumen en la siguiente figura:

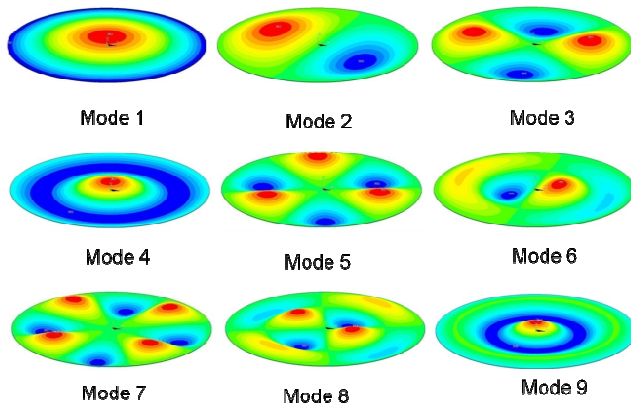


Figura 4: Modos de vibración.

3.2. Ensayo experimental.

En el ensayo se sujeta una muestra del material mediante un marco circular suficientemente rígido y que actúa como barrera para el sonido. Las dimensiones geométricas coinciden con las descritas en el apartado anterior. Para garantizar esto se establece una distancia máxima de separación de la fuente de sonido de 3 cm.

En ocasiones, debido a su pequeño espesor, la membrana es tensionada durante el montaje para eliminar irregularidades y dotarla de cierta rigidez. Este es un aspecto que hay que controlar de forma precisa. El nivel de tensión residual interna se traslada de manera directa modificando su respuesta dinámica por lo que hay que incorporarla al modelo numérico.

Otro aspecto importante del ensayo es la relevancia de situar adecuadamente la fuente de sonido ya que puede introducir acoplamientos entre las frecuencias naturales de la membrana y la onda sonora en el fluido. En nuestro caso se sitúa en un rango de 1 a 2 cm respecto al centro de la membrana y con una inclinación inicial de 45°. Se establece un punto de medida de control junto a la fuente. En este punto se obtienen mediciones de presión sonora que nos permitan obtener funciones de respuesta respecto a esta entrada.

Para las medidas de velocidad se sitúa en la parte posterior de la membrana un vibrómetro laser Ometron VH-1000-D. Las medidas se capturan mediante un módulo LAN IX tipo 3160-A-042 en el entorno de trabajo del software Pulse LabShop.

La mayor limitación de este ensayo reside en no poderse medir la señal de excitación del sistema mecánico que correspondería a la presión sobre la membrana. Ello impide obtener las funciones de transferencia (señal de salida frente a señal de entrada) y por tanto aplicar estrategias de análisis modales experimentales habituales de las que extraer las características dinámicas del sistema (frecuencias y modos de vibración).

Por ello se ha desarrollado una metodología que salve esta limitación, tal y como se justifica en el siguiente apartado.



Figura 5: módulo LAN IX tipo 3160-A-042. y vibrómetro laser Ometron VH-1000-D

3.3. Metodología para la correlación numérico-experimental.

Dada la imposibilidad de obtener la distribución de presiones sobre la membrana, que implicaría la medición de dicha magnitud en ambas caras, se ha dedicado un esfuerzo a establecer la correlación entre las frecuencias naturales de la membrana y la respuesta compleja (acoplamiento mecano-acústico) de todo el sistema.

En la Figura 6, se ha graficado la presión sonora obtenida en el centro de la membrana en ambas caras. Dichas funciones son la respuesta en frecuencia del sistema ante una excitación sonora de 1 Pa en la fuente. Los resultados corresponden a simulaciones numéricas para un material en el que se le ha variado el modulo de Young en el rango que se indica en la figura (material de referencia ABS con densidad 1200 kg/m³, coef. Poisson 0.35 y módulo de Young en el rango de 1 to 3 GPa). La

membrana tiene un diámetro de 1 cm y 40 micras de espesor.

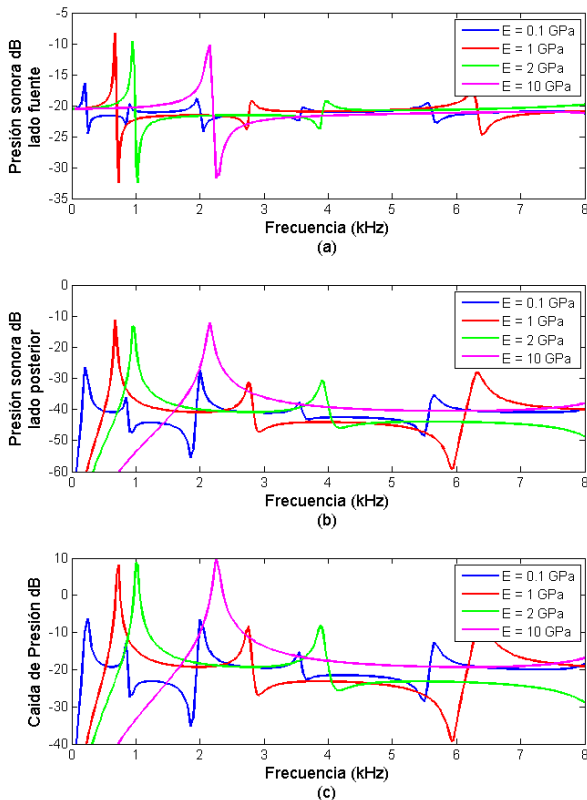


Figura 6: Presión sonora en la parte anterior de la membrana (a), parte posterior (b) y caída de presión a través de la membrana

En la tabla 1 se muestran las frecuencias naturales para las diferentes propiedades de material. Se puede observar la correlación entre los picos de presiones y las respectivas frecuencias naturales (ver modo 1). En la Figura 6c se muestra la diferencia entre ellas (ΔP) que correspondería a la acción que actúa sobre la membrana. En este caso la correlación es mas directa.

E =	0.1 Gpa	1 Gpa	2 Gpa	10 Gpa
Modo	Hz	Hz	Hz	Hz
1	232,43	735,02	1039,5	2324,3
2	483,92	1530,3	2164,1	4839,2
3	795,74	2516,3	3558,7	7957,4
4	906,63	2867	4054,6	9066,3
5	1165,4	3685,5	5212	11654
6	1388,4	4390,6	6209,3	13884
7	1593,7	5039,8	7127,4	15937
8	1933,9	6115,6	8648,7	19339
9	2038	6444,7	9114,2	20380

Tabla 1: frecuencias naturales por modo de vibración para diferentes valores del módulo de Young.

Desde un punto de vista experimental, la medición de presiones presenta una elevada complejidad [5] no siendo un método comúnmente extendido. Por ello se recurre a mediciones de velocidad que a través de las técnicas LDV están bastante extendidas.

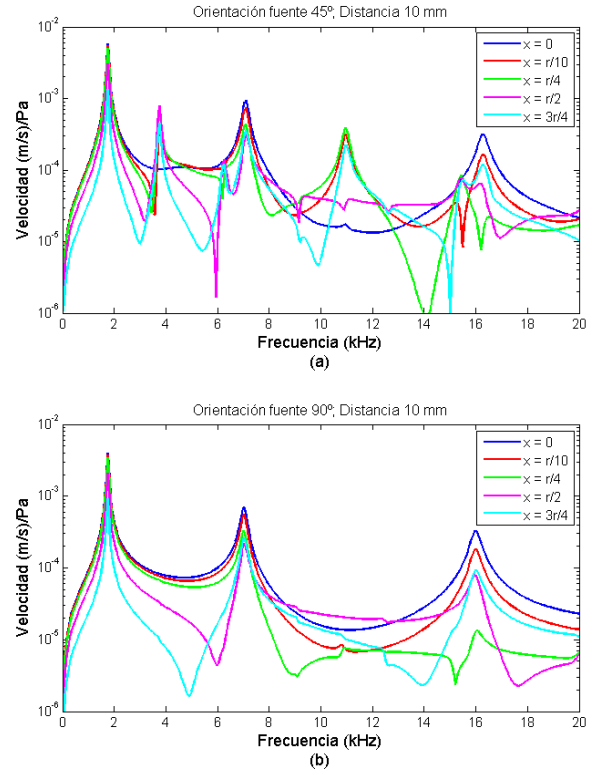


Figura 7: Velocidades obtenidas en diversas posiciones del diámetro de la membrana. Fuente de sonido a 10 mm, con una orientación de (a) 45° y (b) 90°.

En la Figura 7, se grafican resultados de velocidad obtenidos en diversos puntos del diámetro de la membrana. De nuevo son funciones de respuesta en frecuencia del sistema ante una excitación de 1 Pa de presión sonora en la fuente. Los resultados corresponden a simulaciones numéricas de un ensayo experimental con una membrana de acetato con diámetro de 1.5 cm y 100 micras de espesor (propiedades del material: densidad 1300 kg/m², Módulo de Young 5.2 GPa y coef. Poisson 0.3). Las frecuencias naturales obtenidas son las siguientes: $f_1= 1.8$ kHz; $f_2= 3.8$ kHz; $f_3= 6.2$ kHz; $f_4= 7.1$ kHz; $f_5= 9.1$ kHz; $f_6= 10.9$ kHz; $f_7= 12.5$ kHz; $f_8= 15.1$ kHz; $f_9= 16$ kHz.

En la Figura 7a se muestran los resultados correspondientes a un ensayo estándar con la fuente en una orientación de 45°. En esta configuración se observa la presencia de un gran número de picos correspondiente a los principales modos de vibración activos. Existe una dependencia de los resultados respecto de la

selección de la posición de medida, lo cual por un lado incrementa el número de datos con los que ajustar el ensayo pero por otro lado implica una mayor complejidad a la hora de interpretar los resultados obtenidos experimentalmente.

Se ha estudiado la influencia de la posición de la fuente [4] y se ha observado que si se posiciona de manera perpendicular a la membrana, se consiguen respuestas mas repetitivas e independientes del punto del medida del laser. Esto se muestra en la Figura 7b. Se pierde información ya que los únicos modos presentes son los que tienen simetría axial (1, 4 y 9 en este caso) pero una desviación en el punto de medida no es significativa. Para la determinación de un único parámetro experimental esta configuración sería suficiente.

Por último, hay que señalar que los máximos obtenidos con la medición de velocidad no corresponden exactamente con la frecuencia natural [5] pero el error es muy reducido y combinando la presencia de más de una frecuencia, se puede determinar con bastante precisión el módulo de Young.

4. Conclusiones

Se trata de un trabajo preliminar orientado a tratar de determinar las propiedades mecánicas de una membrana utilizando una estrategia de ajuste numérico-experimental. La influencia de la posición de la fuente permite ajustar la respuesta de la membrana a los distintos modos de vibración. Siendo las características de la membrana constantes y no viéndose alteradas por la naturaleza del experimento, podemos establecer estrategias de correlación numérica experimental hasta obtener las propiedades deseadas.

Es de suma importancia adecuar las dimensiones, posiciones de excitación y medida y tensiones externas, de manera que reduzcamos las fuentes de error experimentales. Para eso se hace necesario un trabajo previo numérico donde se ajustan los parámetros y se establecen los rangos de trabajo que mejor comportamiento van a producir.

Actualmente estamos estudiando todos estos parámetros para controlar el experimento y ajustarlo a las características de nuestro laboratorio. Igualmente trabajamos con modelos numéricos que nos permitan identificar formas geométricas que ofrezcan respuestas dinámicas más favorables frente a la toma de datos experimental.

Agradecimientos

Este trabajo está basado en los resultados obtenidos en el proyecto de investigación TEP-6604 financiado por la Consejería de Innovación, Ciencia y Empresa de la Junta de Andalucía (2011).

Referencias

- [1] ASTM E756-05 standard, Standard Test Method for Measuring Vibration-Damping Properties of Materials, American Society for Testing and Materials. 2005.
- [2] Wojtowicki, J. L., Jaouen, L., and Panneton, R., New Approach for the Measurement of Damping Properties of Materials Using the Oberst Beam, *J. American Institute of Physics*, 75 (8), pp. 2569-2574. 2004.
- [3] Lewis, T., Jackson, P., and Nwankwo, O., 1999, Design and Implementation of a Damping Material Measurement/Design System, SAE International Proc. Noise and Vibration Conference, Traverse City, MI, USA. 1999.
- [4] A. Gonzalez-Herrera, J.T. Cheng, J.J. Rosowski, Analysis of the influence of the speaker position on the study of the dynamic behavior of a membrane combining holography technique and finite element models. 22nd Int. Cong. on Sound and Vibration (IIAV), Florence, Italy, 2015.
- [5] A. Gonzalez-Herrera, E.S. Olson, a study of sound transmission in an abstract middle ear using physical and finite element models. *J. Acoust. Soc. Am.* 138(5): 2972–2985, 2015.
- [6] J. Camacho, J. Garcia-Manrique, A. Gonzalez-Herrera, Numerical model to simulate the forward and reverse sound transmission mechanism in hearing. MEDYNA 2017: 2nd Euro-Mediterranean Conference on Structural Dynamics and Vibroacoustics, Sevilla, Spain, 2017.
- [7] I. Sakurada, K. Kaji, S. Wadano, Elastic moduli and structure of low density polyethylene. *Colloid Polymer Sci.* 259, 1208–1213, 1981.